

УДК 624.69.04.519.2

**К ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПЕРЕКРЫТИЙ**

**TO THE PROBABILISTIC ESTIMATION OF THE RELIABILITY
OF REINFORCED CONCRETE HOLLOW-CORE PANELS OF OVERLAPPINGS**

*А.Г. ТАМРАЗЯН, А.И. ДОЛГАНОВ, Д.И. КАЛЕЕВ, Ф.К. ЖИХАРЕВ,
Ю.Н. ЗВОНОВ, С.Э. ЗУБАРЕВА, А. УБЫШ*
*A.G. TAMRAZYAN, A.I. DOLGANOV, D.I. KALEEV, F.K. JIKHAREV,
YU.N. ZVONOV, S.E. ZUBAREVA, A. UBYSH*

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
ООО "Жилэкспертиза",
Вроцлавский технологический университет, Республика Польша)
(National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Ltd Zhilehkspertiza, Wroclaw University of Technology, Republik of Poland)
E-mail: tamrazian@mail.ru

В статье на примере многопустотных панелей перекрытий раскрывается методика оценки надежности изгибаемых железобетонных элементов. При этом используется вероятностный метод линеаризации.

Выбор случайных величин обосновывается результатами обследований. Рассматривается случай с одиночным армированием.

Предлагаются способы удешевления конструкций для определенных нагрузок и сечений.

In article on the example of hollow-core overlapping panels, a methodology for assessing the reliability of bending reinforced concrete elements is disclosed. In this case, the probabilistic method of linearization is used.

The choice of random variables is justified by the results of the surveys. The case of single reinforcement is considered.

There are proposed ways to reduce the cost of structures for certain loads and sections.

Ключевые слова: перекрытие, одиночное армирование, прочность, надежность, изменчивость, предельные состояния, вероятностные методы, метод линеаризации.

Keywords: overlap, single reinforcement, strength, reliability, variability, limit states, probabilistic methods, linearization method.

В 2013-2015 гг. было проведено обследование и выполнена оценка надежности многопустотных панелей перекрытий в здании текстильной промышленности с неполным каркасом.

В данной статье показывается принципиальная возможность использования вероятностного метода линеаризации для оценки надежности конструкций при их проектировании и обследовании.

Под надежностью понималась вероятность безотказной работы в начальный момент времени. Начальная надежность строительного объекта – вероятность неоявления отказа в начальный момент времени. При вычислении начальной надежности не требуется учета процессов, протекающих в конструкции с течением времени.

Нормативная начальная надежность элемента – вероятность того, что его несущая способность в начальный период времени будет больше проектного уровня внешнего воздействия при условии, что все параметры (прочность бетона и арматуры, геометрические размеры) будут находиться в пределах допусков, разрешенных соответствующими ГОСТами.

Для строительных систем с нормальным уровнем ответственности значение надежности принято несколько меньше единицы [1...4] и рекомендовано 0,99865.

Под надежностью панелей перекрытий понимаем вероятность ненаступления первого предельного состояния, для которой требуется значение надежности назначалось 0,99865 (3σ). Функция, характеризующая несущую способность конструкции – вероятность пребывания ее расчетных параметров в области допустимых состояний при соответствующем уровне внешнего воздействия.

Основными силовыми факторами для изгибаемых систем являются изгибающие моменты [5]. Поэтому из всех возможных состояний первой группы рассмотрим прочность нормальных сечений. Другие возможные состояния первой группы не учитываем, как маловероятные и обеспеченные от их наступления конструктивными мероприятиями. Опыт расчета надежности таких конструкций показывает оправданность такого подхода [6].

В принятой концепции отказа не наступает при прогибах, ширине раскрытия трещин, превышающих допустимые нормативные значения, которые, в основном, определяются психологическими, эксплуатационными или другими факторами.

В настоящей работе при расчете надежности учитывались только изменчивости механических характеристик, потому что они наиболее изучены, нормированы соответствующими нормативными документами. Учитываем также, что в расчетные формулы СНиП и СП подставляются средние значения геометрических параметров (их математические ожидания), поэтому они равномерно влияют на надежность.

Для расчета надежности плит перекрытий был выбран метод линеаризации (1)...(5). Этот метод предполагает формульную зависимость функции случайных аргументов, причем эта зависимость должна быть дифференцируемой:

$$m_Y = \varphi(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_n}), \quad (1)$$

$$D_Y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{x_i} + 2 \sum_{i < j} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right)_m K_{ij}, \quad (2)$$

или через средние квадратичные отклонения:

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \phi}{\partial X_i} \right)_m^2 \sigma_{X_i}^2 + 2 \sum_{i < j}^n \left(\frac{\partial \phi}{\partial X_i} \right)_m \left(\frac{\partial \phi}{\partial X_j} \right)_m r_{ij} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}, \quad (3)$$

$$r_{ij} = K_{ij} / (\sigma_i \cdot \sigma_j), \quad (4)$$

где r_{ij} , σ_{X_i} , σ_{X_j} – соответственно коэффициент корреляции и средние квадратические отклонения случайных величин X_i , X_j ; K_{ij} – корреляционный момент случайных величин X_i , X_j :

$$K_{ij} = M[(X_i - m_{X_i})(X_j - m_{X_j})]. \quad (5)$$

Сопротивления бетона и арматуры есть независимые случайные величины, поэтому корреляционные коэффициент r_{ij} и момент K_{ij} принимаем равными нулю.

Выполним расчет надежности сечения плиты перекрытия методом линеаризации [7]. Под отказом сечения будем понимать вероятность неудовлетворения требованиям первой группы предельных состояний – по несущей способности. Несущую способность сечения будем связывать только с изгибающим моментом M_x .

В качестве случайных величин принимаем сопротивления бетона и растянутой арматуры: \tilde{R}_b и \tilde{R}_s . В результате обследования нам известны средние сопротивления и коэффициенты вариации арматуры и бетона: $R_{sm} = 259,12$ МПа, $V_s = 0,045$; $R_{bm} = 42,3 \cdot 10,2 = 43,1$ МПа, $V_b = 0,281$. Расчетный пролет и ширина плит соответственно – 2,94 м и 0,80 м.

Расчетные сопротивления арматуры и бетона: $R_s = 210,0$ МПа; $R_b = 17,5$ МПа. Для $\mu = 0,0053$ рассмотрим случай с одиночным

армированием. Здесь и далее приняты обозначения по [8].

В расчетах учитываем: если $\xi > \xi_R$, то $\xi = \xi_R$. Рассмотрим случай с одиночным армированием ($\mu' = 0$) при расположении нейтрального слоя в полке. Тогда тавровое сечение рассчитываем как прямоугольное шириной $b = b_f'$.

$$M = R_b b h_0^2 \alpha_m + 0,9 R_{sc} \mu', \quad (6)$$

$$\alpha_m = \xi(1 - 0,5\xi), \quad (7)$$

$$\xi = (R_s \mu - R_{sc} \mu') / R_b. \quad (8)$$

Преобразуем выражения (6) ... (8) в одно:

$$m = (R_s \mu - R_{sc} \mu') [1 - 0,5(R_s \mu - R_{sc} \mu') / R_b], \quad (9)$$

где $m = M / (b h_0^2)$.

Далее возьмем частные производные по R_s и R_b . Учитывая, что для большинства конструкций имеем $(h_0 - a') / h_0 = 0,9$, получим:

$$\partial m / \partial R_s = \mu [1 - (R_s \mu - R_{sc} \mu') / R_b], \quad (10)$$

$$\partial m / \partial R_{sc} = -\mu' [1 - (R_s \mu - R_{sc} \mu') / R_b + 0,9], \quad (11)$$

$$\partial m / \partial R_b = 0,5 (R_s \mu - R_{sc} \mu')^2 / R_b^2. \quad (12)$$

Определим средние квадратические отклонения сопротивлений арматуры и бетона, МПа:

$$\sigma_{R_s} = V_s R_{sm} = 0,0053 \cdot 259,12 = 1,373, \quad \sigma_{R_b} = V_b R_{bm} = 0,281 \cdot 43,1 = 12,1. \quad (13)$$

Несущую способность сечения при средних значениях сопротивлений материалов m_Y и среднее квадратическое отклонение несущей способности σ_Y определим соответственно по формулам (1) и (3) с уче-

том (9). В формулы (3) и (9) следует подставлять вместо $R_s - R_{sm}$ и вместо $R_b - R_{bm}$.

Для нашего случая с одиночным армированием:

$$m_Y = 259,12 \cdot (0,0053 - 0) \cdot [1 - 0,5 \cdot 259,12 \cdot (0,0053 - 0) / 43,1] = 1,35, \\ \sigma_Y^2 = \{0,0053 [1 - 259,12 \cdot (0,0053 - 0) / 43,1]\}^2 12,1^2 + \{0,5 \cdot [(259,12 \cdot 0,0053) / 43,1]^2\}^2 \cdot 1,373^2 = 0,0039.$$

Таким образом, имеем $m_Y = 1,351$ МПа, $\sigma_Y = 0,06245$ МПа. Определим несущую способность m_0 с обеспеченностью три стандарта (0,99865):

$$m_0 = m_Y - 3\sigma_Y = 1,351 - 3 \cdot 0,0624 = 1,16 \text{ МПа. (14)}$$

Определим несущую способность сечения m_c по формуле (9) при расчетных сопротивлениях бетона R_b и арматуры R_s и R_{sc} , $m_c = 1,0$ МПа ($\xi = (R_s \mu - R_{sc} \mu') / R_b = 2100 \cdot 0,0053 / 68 = 0,1637$; $x = 0,1637 \cdot 17 = 2,7829$ см; $\alpha_m = \xi(1 - 0,5\xi) = 0,1637 \cdot (1 - 0,5 \cdot 0,1637) = 0,1503$; $m_c = R_b \alpha_m + 0,9R_{sc} \mu' = 6,8 \cdot 0,1503 = 1,0$ МПа). При этом сопро-

$$t = (m_Y - m_q) / \sigma_Y = (1,351 - 0,325) / 0,0624 = 16,44, P(t) \approx 1, \quad (17)$$

где $m_q = q\ell^2 / 8 / (bh_0^2) = 0,00870 \cdot 0,8 \cdot 2,94^2 / (0,80 \cdot 0,17^2) = 0,325$ МПа.

Из (16) и (17) следует, что надежность сечений рассматриваемых элементов значительно выше обеспеченностей расчетных сопротивлений материалов (около 0,99865). Поэтому для плиты можно уменьшить или армирование, или прочность бетона (расход цемента), или увеличить нагрузку. Отметим, что если увеличить нагрузку до 9,25 кПа, то надежность будет 0,99865.

Определим обеспеченность нагрузки 8,7 кПа на перекрытии. В результате обследования было установлено, что минимальная нагрузка на перекрытие с учетом собственного веса равна 8,5 кПа, а максимальная – 10,0 кПа. Используя метод "размаха", определим среднее квадратическое значение нагрузки: $(10,0 - 8,5) / 1,13 = 1,327$ кПа. Коэффициент вариации нагрузки: $1,327 / 9,25 = 0,14$, где $9,25 = (8,5 + 10,0) / 2$. Количество стандартов от среднего значения: $t = (8,70 - 9,25) / 1,327 = -0,41$. Обеспеченность нагрузки $P(t) = 0,34$, то есть вероятность превышения нагрузки – 0,66.

Фактическая надежность плиты с учетом известных разбросов случайных величин будет:

$$R_c = 1 - (1 - 0,9873) \cdot 0,66 \approx 1.$$

тивление бетона будет:

$$R_b = R_{bm} - 3\sigma_{Rb} = 43,1 - 3 \cdot 12,1 = 6,8 \text{ МПа. (15)}$$

Сравним значения несущей способности с обеспеченностью 0,99865 m_0 и m_c :

$$k_c = m_0 / m_c = 1,16 / 1,0 = 1,16. \quad (16)$$

Определим надежность сечения $P(t)$ рассматриваемого элемента, рассчитанного при расчетных значениях сопротивлений материалов, предполагая для несущей способности нормальный закон распределения:

При нагрузке 9,25 кПа надежность плиты перекрытия изменяется незначительно и равна 0,99865.

Дополнительно проведенные расчеты показали, что с увеличением коэффициента армирования коэффициент сочетания свойств материалов K_c уменьшается, следовательно, уменьшается надежность сечений. Этому факту можно найти физическое объяснение: при одинаковом включении в работу бетона и арматуры (при $0,225 \leq \xi / \xi_R \leq 0,725$) "слабый" бетон "поддерживает" арматура и наоборот. Вероятность того что в сечении одновременно будут "плохие" бетон и арматура, очень низкая: $(1 - 0,99865)^2 = 0,0000018225$. При $0,05 \leq \xi / \xi_R < 0,225$ – случай разрушения по арматуре, когда напряжения в арматуре достигают предела текучести, и в предельном состоянии она "течет". Из-за малых значений ξ / ξ_R включение в работу бетона незначительное. Поэтому в случае если арматура – "плохая", то "хорошего" бетона немного, чтобы ей "помочь". Надежность сечения обеспечивается в основном надежностью арматуры. При $\xi = \xi_R$ – это случай, когда полностью используется сопротивление и бетона, и арматуры. При $\xi \gg \xi_R$ – это случай переармирования и разрушения сечения по бетону, то есть случай, когда прочность сечения определяется прочностью бетона. Надежность сечения уменьшается. Известно, что

разброс прочности камня, а бетон есть искусственный камень, больше разброса прочности стали. Поэтому надежность сечения, определяемая в основном бетоном, в дальнейшем стабилизируется.

Таким образом, в указанном выше диапазоне нагрузок плиты перекрытий отвечают требованиям безопасности, и имеют избыточную надежность [2], [9], [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Аугусту Г., Баратта А., Кашиасти Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании. – М.: Стройиздат, 1988.
2. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2015.
3. Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986.
4. Тамразян А.Г. Основные принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений // Вестник МГСУ. – 2011, № 2-1. С. 21...27.
5. Rybak J., Zyrek T. Time dependent factors in driven pile capacity control // 14th International Multi-disciplinary Scientific GeoConference SGEM, Albena, Bulgaria. 17-26 June, 2014. – Vol.2, 2014. P.995...1002.
6. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions // Applied Mechanics and Materials. –V. 467, 2014. P. 404...409.
7. Долганов А.И. Оценка надежности монолитных многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. – 2010, № 8. С. 50...51.
8. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.
9. Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 г. "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений".

10. Тамразян А.Г. Расчет элементов конструкций при заданной надежности и нормальном распределении нагрузки и несущей способности // Вестник МГСУ. – 2012, № 10. С.109...115.

REFERENCES

1. Augusti G., Baratta A., Kashiati F. Verojatnostnye metody v stroitel'nom proektirovanii. – M.: Strojizdat, 1988.
2. GOST 27751–2014. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozhenija. – M.: Standartinform, 2015.
3. Rajzer V.D. Metody teorii nadezhnosti v zadachah normirovanija raschetnyh parametrov stroitel'nyh konstrukcij. – M.: Strojizdat, 1986.
4. Tamrazjan A.G. Osnovnye principy ocenki riska pri proektirovanii zdaniy i sooruzhenij // Vestnik MGSU. – 2011, № 2-1. S. 21...27.
5. Rybak J., Zyrek T. Time dependent factors in driven pile capacity control // 14th International Multi-disciplinary Scientific GeoConference SGEM, Albena, Bulgaria. 17-26 June, 2014. – Vol.2, 2014. P.995...1002.
6. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions // Applied Mechanics and Materials. –V. 467, 2014. P. 404...409.
7. Dolganov A.I. Ocenka nadezhnosti monolitnyh mnogoetazhnyh zdaniy // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2010, № 8. S. 50...51.
8. SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozhenija. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 52-01-2003.
9. Federal'nyj zakon № 384-FZ ot 30.12.2009 g. "Tehnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij".
10. Tamrazjan A.G. Raschet jelementov konstrukcij pri zadannoj nadezhnosti i normal'nom raspredelenii nagruzki i nesushhej sposobnosti // Vestnik MGSU. – 2012, № 10. S.109...115.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций МГСУ. Поступила 17.08.17.